

Extracción y Estudio de la dependencia con la Polarización y la Temperatura del Modelo Pequeña Señal para Transistores Encapsulados GaAs MESFET

Mohamed Chaibi⁽¹⁾, Alberto Chico⁽¹⁾, Tomás Fernández⁽¹⁾, Abdelwahed Tribak⁽¹⁾, Angel Mediavilla⁽¹⁾, Mohamed Aghoutane⁽²⁾

mohamed.chaibi@unican.es, tomas.fernandez@unican.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria.

Avd. de los Castros, s/n, 39005, Santander, Spain.

⁽²⁾ Dpt. de Physique. Faculté des Sciences. Université Abdelmalek Essaadi.

B.P. 2121 Tétouan, Morocco.

Abstract- An extraction technique of the small signal equivalent circuit parameters of GaAs MESFET packaged transistor and their dependence on both bias and temperature are presented. This method is based on four steps which are: 1) extrinsic elements (package elements not included) are extracted from S parameters measurements of the transistor biased under cold and pinch-off condition, 2) package effects parameters are then determined through optimisation from S parameters measurements of the transistor under pinch-off condition, 3) the optimal extrinsic parameters, including package parameters, are searched through optimisation algorithm from S parameters measurements of the transistor biased at normal condition (hot transistor) using the starting values already obtained. This step allows us to obtain independent intrinsic elements of frequency and finally 4) the temperature and bias-dependent intrinsic elements are directly extracted from multi-bias S parameters measurement over a wide range of temperature (from -30°C to +70°C). The validity of the proposed method and the small signal model is verified by comparing the simulated wide band S parameters, over a wide bias and temperature range, with measured data of a GaAs MESFET transistor.

I. INTRODUCCIÓN

Los transistores GaAs MESFET son los componentes fundamentales para el diseño y la fabricación de los circuitos de RF y microondas como los amplificadores de bajo ruido gracias a sus mejores prestaciones de bajo ruido, alta ganancia y frecuencia de corte. Algunos de estos circuitos están diseñados para ser utilizados en lugares donde la temperatura ambiente es muy cambiante. Por ello, es necesario desarrollar modelos precisos pequeña señal útiles para el diseño de este tipo de circuitos así como los métodos de extracción de los valores de sus parámetros teniendo en cuenta su dependencia con la temperatura. Por otro lado, los parámetros del modelo pequeña señal extraídos en diferentes puntos de polarización se usan dentro del modelo gran señal del dispositivo.

Existen muchas técnicas para la extracción de los elementos del modelo pequeña señal de este tipo de transistores tanto extrínsecos como intrínsecos. Sin embargo, las dificultades aparecen cuando se trata de transistores encapsulados donde hay que incluir en el modelo elementos adicionales que den cuenta los efectos parásitos introducidos por la cápsula y por lo tanto hay que desarrollar técnicas especiales para la extracción de sus valores.

En este artículo se propone un modelo pequeña señal de un transistor GaAs MESFET así como la extracción de sus elementos y el estudio de su dependencia con la polarización y la temperatura ambiente.

II. EXTRACCIÓN DEL MODELO PEQUEÑA SEÑAL

En la figura 1 se representa el circuito equivalente del modelo pequeña señal propuesto para un transistor MESFET encapsulado. El modelo está compuesto de una parte intrínseca y otra extrínseca donde los elementos Lpg, Lpd y Cpgd modelan el efecto de la cápsula. Las capacidades Cpg y Cpd incluyen los efectos parásitos de la cápsula y del chip del transistor.

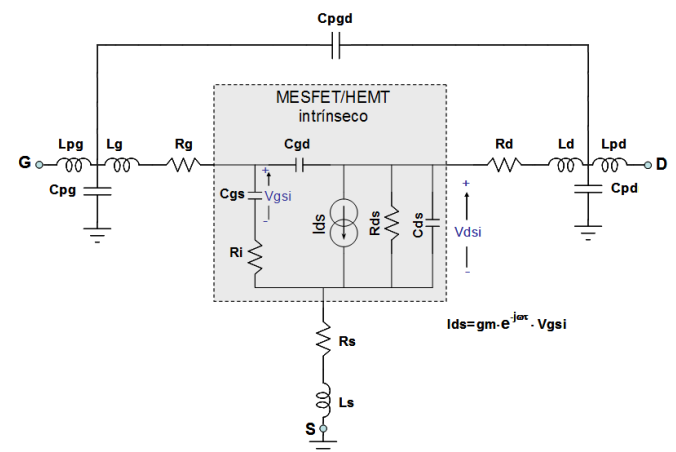


Fig. 1. Modelo pequeña señal del transistor MESFET encapsulado.

La extracción de los elementos del modelo se lleva a cabo en cuatro etapas: 1) Los elementos extrínsecos (Lpg, Lpd y Cpgd no incluidos) se extraen de las medidas del transistor polarizado bajo la condición de pinch-off ($V_{ds}=0V$, $V_{gs}<V_p$) y sin polarización ($V_{ds}=0V$, $V_{gs}=0V$). 2) Los elementos que modelan la cápsula se determinan mediante un proceso de optimización a partir de las medidas de los parámetros S del transistor polarizado en pinch-off. 3) Los valores óptimos de los parámetros extrínsecos, incluyendo de la cápsula, se recalculan de nuevo mediante un proceso de optimización a partir de las medidas de los parámetros S del transistor polarizado en un punto de funcionamiento normal (transistor caliente) usando como elementos iniciales aquellos obtenidos anteriormente. 4) La dependencia de los elementos

intrínsecos con la polarización y la temperatura se lleva a cabo mediante una extracción multibanda directa a partir de las medidas de los parámetros S medidos en un amplio rango de polarización para varias temperaturas.

A. Extracción de los elementos extrínsecos

En esta fase se supone que los elementos extrínsecos del encapsulado (Lpg, Lpd, Cpgd) no tienen efecto sobre el modelo del transistor y por lo tanto sus valores se asuman que son nulos. Los elementos extrínsecos del chip del transistor (Lg, Ld, Ls, Rg, Rd, Rs, Cpg, Cpd) se extraen de las medidas de los parámetros de Scattering del transistor en dos condiciones de polarización: pinch-off ($V_{ds}=0V$, $V_{gs}<V_p$) y sin polarizar ($V_{ds}=0V$, $V_{gs}=0V$), lo que se conoce como condiciones del transistor en frío [1,2]. Bajo estas condiciones de polarización el circuito equivalente del transistor se reduce a unos circuitos donde se puede extraer fácilmente los elementos extrínsecos del modelo del dispositivo a través las apropiadas transformaciones matriciales (parámetros S, Z, Y) y las siguientes ecuaciones referidas a los elementos de la matriz [Z] ó [Y] del circuito equivalente en cada caso:

Transistor en pinch-off:

$$\operatorname{Re}(z_{11p}) = R_s + R_g \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(y_{11p}) = \omega(Cpg + 2Cb); \operatorname{Im}(y_{22p}) = \omega(Cpd + Cb) \quad (2)$$

$$\operatorname{Im}(y_{12p}) = \operatorname{Im}(y_{21p}) = -\omega Cb \quad (3)$$

Transistor sin polarizar:

$$z_{11s} = R_s + 0.5Rch + R_g + j\left(\omega(Ls + Lg) - \frac{1}{\omega Cg}\right) \quad (4)$$

$$z_{12s} = z_{21s} = R_s + 0.5Rch + j\omega Ls \quad (5)$$

$$z_{22s} = R_s + Rch + R_d + j\omega(Ld + Ls) \quad (6)$$

Las resistencias Rg, Rd y Rs se calculan directamente a partir de la parte real de los parámetros Z del transistor sin polarizar (ecuaciones (4)-(6), y de la parte real del parámetro Z_{11p} del transistor en pinch-off (ecuación (1)).

Las capacidades Cpg y Cpd se determinan con la parte imaginaria de la matriz Y del transistor en pinch-off, mediante las ecuaciones (2) y (3).

Las inductancias Lg, Ld y Ls se determinan desde la parte imaginaria de los parámetros Z del transistor sin polarizar. Así, podemos calcular Ls utilizando la ecuación (5) y Ld utilizando la ecuación (6). El valor de Lg se estima mediante el ajuste de la parte imaginaria de la ecuación (4) optimizando los parámetros Lg y Cg en cada frecuencia.

B. Extracción de los elementos de la cápsula

A partir de las medidas del transistor en pinch-off, se optimizan todos los elementos extrínsecos del modelo siguiendo el circuito equivalente mostrado en la figura 2, fijando como valores iniciales los obtenidos anteriormente y Lpg=0, Lpd=0 y Cpgd=0, todo esto minimizando la función error que relaciona los parámetros S medidos y modelados del transistor polarizado en esta condición.

C. Extracción de los elementos extrínsecos óptimos

Una vez se han calculado los elementos extrínsecos, los intrínsecos se calculan mediante extracción directa, como se explicará en el siguiente apartado, en un punto de funcionamiento normal del transistor a partir de las medidas de los parámetros S en ese punto. Sin embargo, en teoría los elementos intrínsecos no deben que variar con la frecuencia, pero se demostró que en

realidad sí se producían variaciones, lo que genera malos resultados en el modelado cuando se toma como media los valores de estos elementos en el rango de frecuencia de extracción. Así, se realizó un programa que optimiza todos los elementos extrínsecos en un punto de polarización distinto a los del transistor en frío, partiendo de los valores iniciales calculados anteriormente. El hecho de que se parta de esos elementos iniciales garantiza la convergencia del proceso de optimización con valores óptimos de los valores extrínsecos. El organigrama del proceso de determinación de esos elementos se presenta en la figura 3.

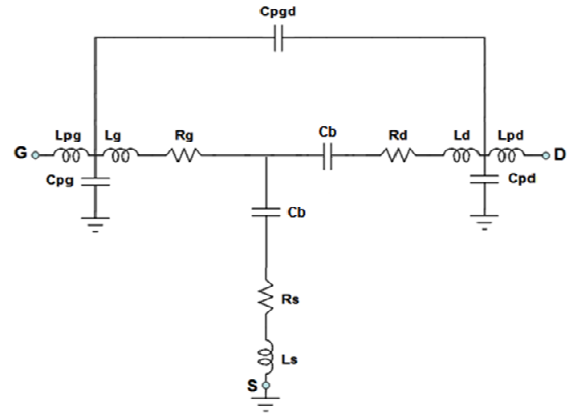


Fig. 2. Circuito equivalente del transistor MESFET en pinch-off incluyendo elementos adicionales de encapsulado.

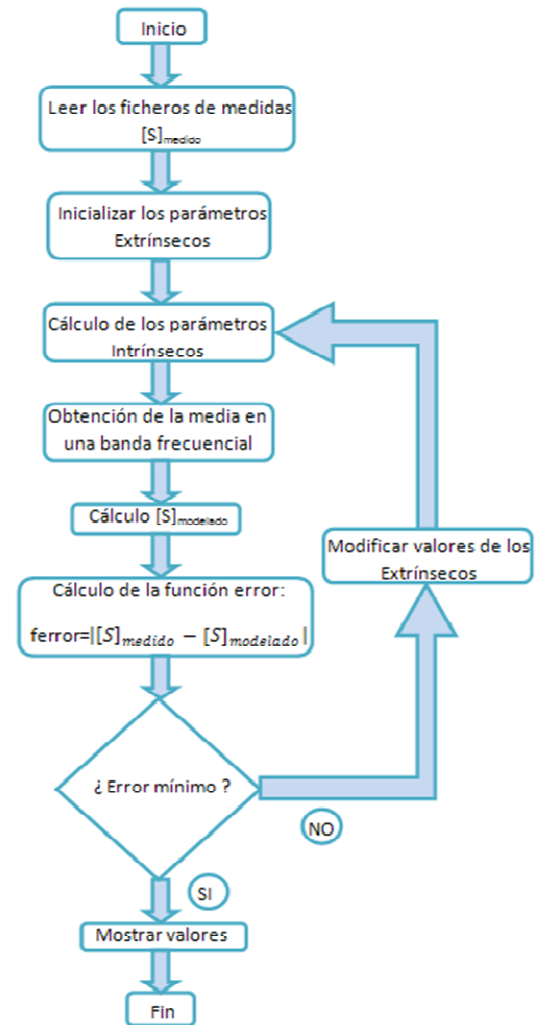


Fig. 3. Organigrama de la extracción de los elementos extrínsecos óptimos del modelo pequeña señal del transistor MESFET.

D. Extracción de los elementos intrínsecos

Una vez estimados los elementos extrínsecos óptimos, se calcula la matriz Y de la parte intrínseca del modelo con la eliminación de los elementos extrínsecos mediante un proceso de de-embedding a través de las apropiadas transformaciones matriciales (parámetros S, Z e Y). A partir de la matriz intrínseca del modelo (Y_{int}) se puede determinar de forma analítica todos los elementos intrínsecos, mediante las ecuaciones expresadas a continuación.

$$C_{gd} = \frac{-\text{Im}(y_{\text{int}12})}{\omega}; C_{ds} = \frac{\text{Im}(y_{\text{int}22}) + \text{Im}(y_{\text{int}12})}{\omega} \quad (7)$$

$$C_{gs} = \left(\frac{1+D^2}{\omega} \right) (\text{Im}(y_{\text{int}11}) + \text{Im}(y_{\text{int}12})) \quad (8)$$

$$R_i = \frac{D}{(1+D^2)(\text{Im}(y_{\text{int}11}) + \text{Im}(y_{\text{int}12}))} \quad (9)$$

$$gm = \left[\left(\text{Re}(y_{\text{int}21})^2 + (\text{Im}(y_{\text{int}21}) - \text{Im}(y_{\text{int}12}))^2 \right) (1+D^2) \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{-1}{\omega} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{D \text{Re}(y_{\text{int}21}) + (\text{Im}(y_{\text{int}21}) - \text{Im}(y_{\text{int}12}))}{\text{Re}(y_{\text{int}21}) - D(\text{Im}(y_{\text{int}21}) - \text{Im}(y_{\text{int}12}))} \right] \right\} \quad (11)$$

$$g_{ds} = \frac{1}{R_{ds}} = \text{Re}(y_{\text{int}22}); D = \frac{\text{Re}(y_{\text{int}11})}{\text{Im}(y_{\text{int}11}) + \text{Im}(y_{\text{int}12})} \quad (12)$$

Para probar la validez del modelo propuesto, así como el método de extracción, se ha aplicado la técnica al dispositivo MGF1923 (GaAs MESFET de Mitsubishi Semiconductor). Las medidas se han llevado a cabo utilizando un analizador de redes vectorial PNA E8364A de Agilent Technologies. Para realizar estas medidas es necesario tener un “kit” propio de calibración, dado que el transistor se mide montado sobre un circuito microstrip que conforma su “test-fixture”. En este trabajo se realizó el diseño y fabricación de unos estándares propios que se utilizaron para hacer una calibración TRL por ser más usada en medidas de transistores encapsulados. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos de los elementos del modelo, así como en la figura 4 se representa los parámetros de Scattering medidos y modelados en el punto de polarización (V_{gs}=-0.6V, V_{ds}=3V). Como se puede observar, los resultados que genera el modelo son excelentes.

Parámetros extrínsecos
$R_g=1.82\Omega$; $R_d=1.58\Omega$; $R_s=1.52\Omega$
$C_{pg}=0.14\text{pF}$; $C_{pd}=0.16\text{pF}$; $C_{gd}=17.42\text{fF}$
$L_{pg}=99.67\text{pH}$; $L_{pd}=0.2\text{nH}$; $L_g=0.58\text{nH}$; $L_d=0.62\text{nH}$; $L_s=62.42\text{pH}$
Parámetros intrínsecos
$gm=44.55\text{mS}$; $g_{ds}=3.67\text{mS}$; $R_i=6.32\Omega$; $\tau=3.8\text{pseg}$
$C_{gs}=0.36\text{pF}$; $C_{gd}=6.3\text{fF}$; $c_{ds}=0.13\text{pF}$

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo para el transistor MGF1923.

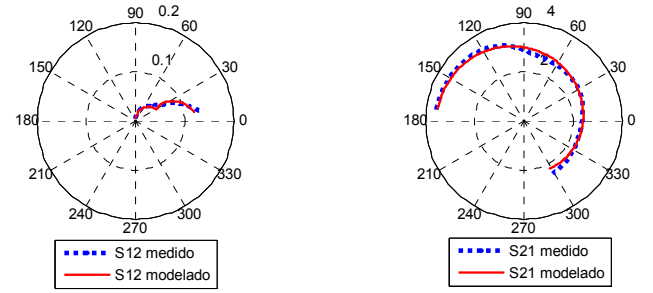
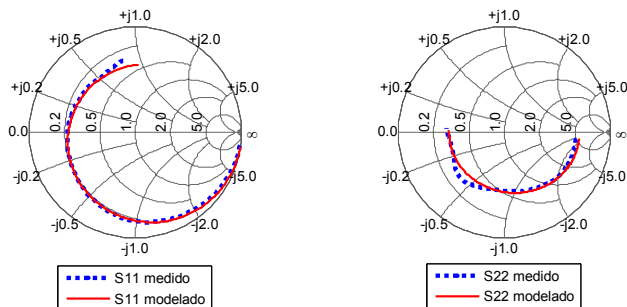


Fig. 4. Parámetros S medidos y modelados del transistor MGF1923 en el rango de frecuencia (0.4-15Ghz).

III. DEPENDENCIA DEL MODELO CON LA POLARIZACIÓN

La dependencia de los elementos intrínsecos con la polarización se lleva a cabo haciendo una extracción multibias. Para esto, se han fijado los elementos extrínsecos a los valores óptimos que se muestran en la Tabla 1, puesto que no dependen del de la polarización, mientras que los elementos intrínsecos se han calculado directamente usando las ecuaciones (7)-(12) a partir de las medidas de parámetros S en los diferentes puntos de polarización sin ningún proceso de optimización adicional.

En las figuras 5 y 6 se muestra la variación de los elementos intrínsecos con la polarización.

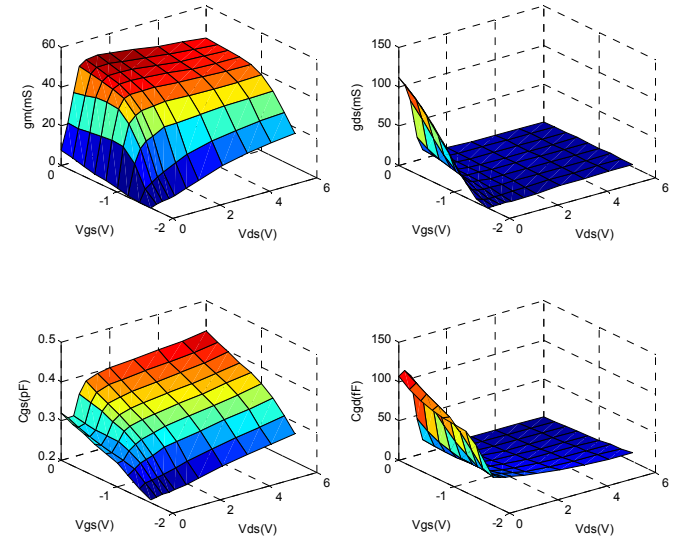


Fig. 5. Variación de gm, gds, Cgs y Cgd con la polarización.

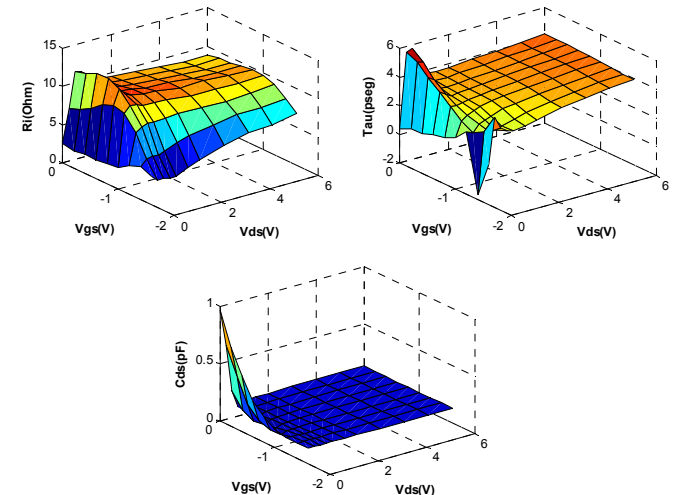


Fig. 6. Variación de Ri, Tau (τ) y Cds con la polarización.

Los elementos R_i , τ y C_{ds} no varían con la polarización en las zonas de funcionamiento habitual de este tipo de transistores y por lo tanto se consideran como elementos lineales a la hora de construir los modelos no lineales. Debido a estos resultados, los valores de estos elementos lineales se estiman en la zona de saturación del transistor ($V_{ds} > 1V$ en este caso). El resto de los elementos son variables con la polarización y se consideran como elementos no lineales. Los resultados obtenidos concuerdan con la teoría y las expresiones utilizadas para el modelado de los transistores GaAs MESFET [3].

IV. DEPENDENCIA DEL MODELO CON LA TEMPERATURA

Para estudiar la variación de los elementos del modelo pequeña señal del dispositivo con la temperatura, se ha hecho una extracción multibias siguiendo todo el proceso presentado anteriormente en un rango de temperatura desde $-30^\circ C$ hasta $70^\circ C$.

Los elementos extrínsecos dependen poco de la temperatura, de hecho, se puede considerar que no dependen de la temperatura debido a que modelan el efecto del chip y el encapsulado del transistor. Los elementos intrínsecos que se pueden considerar variables con la temperatura, según los resultados obtenidos, son g_m , C_{gs} y C_{gd} . El resto de los elementos pueden considerarse independientes de la temperatura [4].

En las figuras 7, 8 y 9 se muestra la variación de la transconductancia g_m y las capacidades de las uniones Schottky C_{gs} y C_{gd} con la temperatura. Según esas gráficas, la transconductancia es que varía mucho con la temperatura, de hecho, afecta mucho la ganancia del transistor.

El estudio de la variación de los elementos del modelo pequeña señal con la temperatura es muy importante para el modelado no lineal de este tipo de transistores dado que los parámetros del modelo no lineal se extraen a partir de una extracción lineal multibias.

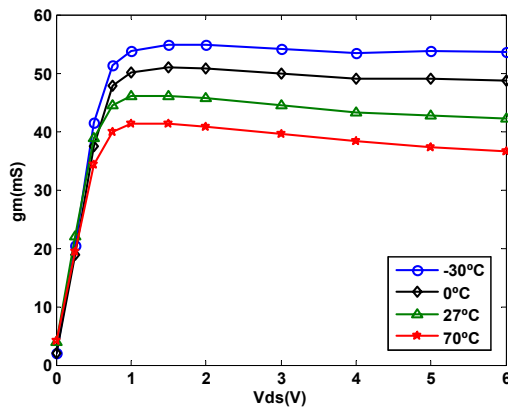


Fig. 7. Variación de g_m con la temperatura ($V_{gs} = -0.6V$).

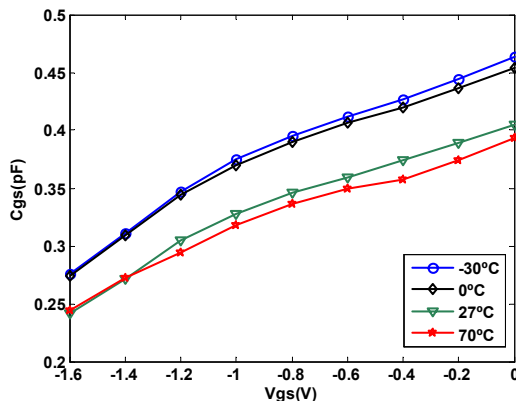


Fig. 8. Variación de C_{gs} con la temperatura ($V_{ds} = 3V$).

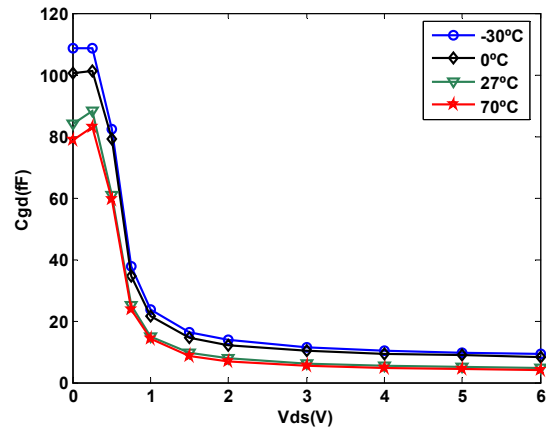


Fig. 9. Variación de C_{gd} con la temperatura ($V_{gs} = -0.6V$).

V. CONCLUSIONES

La extracción lineal de los elementos del modelo pequeña señal de un transistor así como el estudio de la dependencia de estos elementos con la polarización y la temperatura es una etapa muy importante para la extracción de su modelo completo no lineal dado que el último se basa directamente en la extracción multibias del primero en el rango de temperatura de interés.

En este artículo se ha presentado un circuito equivalente del modelo pequeña señal de un transistor GaAs MESFET encapsulado así como un método de extracción de sus elementos incluso aquellos que modelan el efecto de la cápsula del transistor. A continuación se aplicó la técnica de extracción para varios puntos de polarización, en un amplio rango de temperatura, para estudiar la variación de los elementos del modelo tanto con la polarización como la temperatura. La técnica de extracción se basa en las medidas de los parámetros S en muchos puntos de polarización para varias temperaturas, utilizando procesos de optimización.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la capacidad, tanto del modelo propuesto como la técnica de extracción de sus elementos, de reproducir adecuadamente los parámetros de Scattering del transistor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al proyecto TEC2005-07985-C03-01, Ministerio de Educación y Ciencia, dentro del cual se han obtenido los resultados presentados en este artículo. Igualmente queremos hacer constar nuestra gratitud a la AECID a través de su programa "Becas para Extranjeros no Iberoamericanos para Estudios de Postgrado, Doctorado y Postdoctorado en Universidades y Centros Superiores en España".

REFERENCES

- [1] G. Dambrine, A. Cappy, F. Heliodore and E. Playez, "A New Method for Determining the FET Small-Signal Equivalent Circuit," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 36, no. 7, pp. 1151-1159, July 1988.
- [2] R. Tayrani, J. E. Gerber, T. Daniel, R. S. Pengelly and U. L. Rohde, "A new and reliable direct parasitic extraction method for MESFETs and HEMTs," *Proceedings of the 23rd European Microwave Conference*, Madrid, Spain, Sept. 1993, vol. 1, pp. 451-453.
- [3] J. M. Golio, "Microwave MESFETs and HEMTs," *Artech House, Inc.*, Boston, London, 1991.
- [4] S. M. Lardizabal, A. S. Fernandez and L. P. Dunleavy, "Temperature-Dependent Modeling of Gallium Arsenide MESFET's," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 44, no. 3, pp. 357-363, March 1996.